

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	家庭環境に向けた人間行動観察学習システムのためのトップダウン知識に基づく把持・操作スキルライブラリ的设计
Title(English)	
著者(和文)	齊藤大智
Author(English)	Daichi Saito
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第327号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小池 英樹,篠田 浩一,三宅 美博,金崎 朝子,井上 中順
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第327号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	情報工学 情報工学	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	齊藤大智		審査員主査： Chief Examiner	小池英樹

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文では、「家庭環境に向けた人間行動観察学習システムのためのトップダウン知識に基づく把持・操作スキルライブラリの設計」と題し、人間行動観察学習システムに組み込み可能な Grasp, In-hand manipulation, Compliant manipulation に対する動作プリミティブの導出と、そのプリミティブスキルの学習設計について述べている。本論文は和文 8 章からなる。

第 1 章「序論」では、研究の背景として、家庭用ロボットにおける汎用的な作業スキルの学習の重要性と作業の多様化によるスキル獲得の困難さを述べている。そして、解決策として作業全体を適当なプリミティブに分割して各プリミティブに対して再利用可能なスキルを学習させる手法があるが、対象作業に応じて恣意的にスキル列挙をしており動作の漏れが生じるという問題を指摘している。この問題を解決できる分野として、動作目的や物体への接触状態の変化の観察から得られるトップダウン知識を用いて網羅的に動作プリミティブを導出する分野である人間行動観察学習 (Learning-from-Observation, LfO) が存在するが、これまでの多くの研究では工場環境を想定してプリミティブを導出していたことを指摘している。この LfO を家庭環境に拡張するために、本論文では LfO で得られてきたトップダウン知識に基づいて、家庭内作業で基礎的で頻出である Grasp, In-hand manipulation, Compliant manipulation をプリミティブに再分類し、家庭環境のような非構造化環境でも再利用可能なプリミティブスキルの学習を行うことを述べている。

第 2 章「関連研究」では、非構造化環境におけるスキル獲得に関する関連研究を概観し、その後、Grasp, In-hand manipulation, Compliant manipulation のそれぞれの動作に対して、(1)家庭内作業において適したプリミティブの選択が可能であるか、(2)非構造化環境において再利用可能なスキルであるかという二つの視点から関連研究をまとめ上げている。

第 3 章「トップダウン知識に基づくロボットスキルライブラリの設計の提案」では、本論文の焦点とそのアプローチについて述べている。プリミティブスキルの学習設計ではプリミティブ内の動作が持つ共通要素に着目した設計を行うことで非構造化環境でも再利用可能なスキルの学習を行うことを述べている。さらに、本論文で提案するスキルライブラリを LfO システムへ組み込んだシステム全体像についても述べている。

第 4 章「Grasp に関するスキルライブラリの設計」では、家庭内作業における把持プリミティブとその学習方法を提案している。まず、既存の人間の把持分類とロボットの把持分類を比較することで力のかけ方という観点でロボット把持を分類した Force-exertion type を提案している。次に、把持は接触点によって特徴づけられることから、接触点位置に関する報酬設計を用いたプリミティブスキルの学習を提案している。シミュレーションと実機実験において、物体の位置姿勢や形状、アプローチ方向を変えた際の成功率を調査した。実機では、六種類の物体の中で五種類の物体では 5 回全ての試行で、残りの一種類では 5 回中 4 回で把持に成功できることを述べている。また、LfO システムと組み合わせることで、冷蔵庫の重い扉を開くという適切なプリミティブ選択が必要な作業が可能になることを示している。さらに、提案スキルがモジュールとして組み込み可能であり、他の様々な作業に対しても再利用可能であることを確認している。

第 5 章「In-hand manipulation に関するスキルライブラリの設計」では、把持プリミティブの遷移を行うための in-hand manipulation に対するプリミティブとその学習方法を提案している。まず、接触状態遷移に基づくプリミティブ (APriCoT) を導入している。APriCoT を導出するために、まずあり得る接触状態を列挙し、それらの遷移を考察している。実験では、active-force closure で箱を掴んだ状態から開始し、箱を半回転させて active-force closure で箱を掴んだ状態で終了する操作を対象として、既存研究との比較や提案手法の成功率を調査している。既存手法では対象操作は学習できない一方で、提案手法では学習できることを示している。また、物体の位置姿勢や形状を変化させた際に 92.0%の成功率で操作が可能であることを確認している。

第 6 章「Compliant manipulation に関するスキルライブラリの設計」では、既存の物体拘束に基づいた compliant manipulation の分類に基づいてプリミティブ設計をし、プリミティブに含まれる複数動作に再利用可能なスキル (Constraint-aware policy) を提案している。スキル学習の際に、物体拘束に基づいて設計された環境と報酬設計を用いた学習設計を提案している。本論文では、物体拘束が Prismatic 拘束の場合と Revolute 拘束の場合に対して学習設計をしている。シミュレーションと実機実験においてプリミティブ内の多様な操作に対する提案スキルの成功率を調査し、再利用可能性を検証している。シミュレーション実験では、引き出し開け、板引き、棒引き、ドア開け、ハンドル回しに対して 13 回の試行全てで成功することを確認している。また、実機実験では引き出し開けによってスキルの sim2real 性能を確認しており、10 回中 7 回成功することを

述べている。

第7章「議論」では、まず(1)家庭内作業において適したプリミティブの選択が可能であり、(2)非構造化環境において再利用可能なスキルを持つスキルライブラリの一部分が設計できたことを確認している。そして、今後の展望や本論文の限界についてまとめ、今後の研究に対して手がかりを残している。

第8章「結論」では、第3章から第6章で述べた提案や実験結果をまとめ、提案手法による汎用的なスキル獲得に対する利点を述べている。また、本論文で提案したプリミティブはLf0だけではなく、他のタスクプランナに対しても貢献できる可能性があることを述べている。

以上、本論文では、多様な家庭内作業に対する汎用的なスキル獲得という目的に対して、トップダウン知識から家庭内作業を網羅的に複数のプリミティブに分類し、そのプリミティブに対して非構造化環境でも再利用可能なスキルを設計することを提案している。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	情報工学 情報工学	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	齊藤大智		審査員主査： Chief Examiner	小池英樹

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This paper aims to design a skill library for Learning-from-Observation (LfO) in household robots capable of performing domestic tasks that involve dexterous manipulation using both the hand and arm. Among such manipulations, we specifically focus on Grasp, In-hand manipulation, and Compliant manipulation. To enable household robots to perform domestic tasks, it is crucial to design a skill library composed of motion primitives that are both suitable for household environments and reusable in unstructured environments. However, previous research has not designed such a required library.

To address this issue, this paper proposes designing a skill library based on top-down knowledge, such as the underlying intent of movements and the commonalities among different manipulations. Based on the knowledge, previous studies have shown that tasks requiring Grasp, In-hand manipulation, and Compliant manipulation can be classified into several motion primitives. In this paper, we leverage such top-down knowledge from prior research to reclassify domestic tasks and derive motion primitives. The skill library is then constructed from skills learned for each motion primitive. These skills are acquired through deep reinforcement learning. By designing skills based on common elements within each primitive, we ensure their reusability across a diverse set of actions within the primitive.

By integrating the proposed skill library with Learning-from-Observation, a type of task planner, we demonstrate that tasks requiring the appropriate selection of primitives in consideration of subsequent skills can be successfully executed. Additionally, experiments using both simulations and real robots validate the reusability of the learned skills.

The advantage of designing a skill library based on top-down knowledge is that skills can be developed based on shared characteristics within a primitive, allowing for the learning of generalized skills applicable to multiple actions within the primitive. The actions involved in domestic tasks can be classified into a finite number of primitives. Consequently, by learning skills for each primitive based on top-down knowledge, it becomes possible to achieve an infinite variety of actions using only a finite number of skills. Furthermore, the reusability of these skills enables them to be integrated into a system as modular components. When multiple reusable modules exist, various tasks can be executed by combining them. This approach allows robots to perform unknown tasks without the need for relearning, even if the target tasks change. This thesis represents a first step toward realizing such a generalized skill library.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).